

Filière Systèmes industriels

Orientation Infotronics

Travail de bachelor

Diplôme 2019

*Johan Chenaux*

SensorBall for avalanche analysis

|  |  |
| --- | --- |
|  | *Professeur* Alexandra Andersson |
|  | *Expert* Prénom Nom |
|  | *Date de la remise du rapport* 16.08.2019 |

Table des matières

[1 Introduction 4](#_Toc13139890)

[1.1 But du projet 4](#_Toc13139891)

[1.2 Tâches à réaliser 4](#_Toc13139892)

[2 Conception 5](#_Toc13139893)

[2.1 Schéma de principe 5](#_Toc13139894)

[2.2 Antenne log-périodique 6](#_Toc13139895)

[2.2.1 Définition 6](#_Toc13139896)

[2.2.2 Analyse 6](#_Toc13139897)

[2.2.3 Design 7](#_Toc13139898)

[2.2.4 Simulation 10](#_Toc13139899)

[2.2.5 Tests et résultats 14](#_Toc13139900)

[2.3 Antenne en boucle (Loop Antenna) 18](#_Toc13139901)

[2.3.1 Définition 18](#_Toc13139902)

[2.3.2 Analyse 18](#_Toc13139903)

[2.3.3 Design 18](#_Toc13139904)

[2.3.4 Simulation 20](#_Toc13139905)

[2.4 Circuit d’interface 21](#_Toc13139906)

[3 Programmation 21](#_Toc13139907)

[3.1 Logique 21](#_Toc13139908)

[3.2 Affichage 21](#_Toc13139909)

[4 Tests et résultats finaux 21](#_Toc13139910)

[5 Améliorations futures 21](#_Toc13139911)

[6 Conclusion 21](#_Toc13139912)

[7 Annexes 21](#_Toc13139913)

[Figure 1 : schéma de principe 5](#_Toc13139914)

[Figure 2: antenne log-périodique 6](file:///R:\Diploma\TD2019\SYND\johan.chenaux\Rapport\TD_2019.docx#_Toc13139915)

[Figure 3 : radiation de l'antenne LPDA 6](#_Toc13139916)

[Figure 4: Directivité constante vs σ et τ 7](#_Toc13139917)

[Figure 5: représentation d'un LPDA 8](#_Toc13139918)

[Figure 6: design final de l'antenne LPDA 10](#_Toc13139919)

[Figure 7 : réflexion de l'antenne LPDA 12](#_Toc13139920)

[Figure 8 : impédance de l'antenne LPDA 12](#_Toc13139921)

[Figure 9 : radiation de l'antenne LPDA 13](#_Toc13139922)

[Figure 10 : radiation de l'antenne LPDA avec l'antenne 13](#_Toc13139923)

[Figure 11 : schéma PCB test LPDA 14](#_Toc13139924)

[Figure 12 : réflexion de l'antenne LPDA 15](#_Toc13139925)

[Figure 13 : impédance de l'antenne LPDA 16](#_Toc13139926)

[Figure 14 : Smith chart simulé de la LPD 17](#_Toc13139927)

[Figure 15 : Smith chart mesuré de la LPDA 17](#_Toc13139928)

[Figure 16: design final de l'antenne LOOP 19](#_Toc13139929)

[Figure 7 : réflexion de l'antenne LPDA 20](#_Toc13139930)

[*Tableau 1: longueur des éléments de l'antenne* 9](#_Toc13139931)

[Tableau 2: distance de chaque éléments de l'antenne (par rapport au point 0) 9](#_Toc13139932)

# Introduction

La Suisse compte énormément de stations de skis dans ses montagnes. Et, lorsqu’il est question de ski, on pense forcements aux avalanches qui causent de nombreux accidents souvent mortels.

C’est pourquoi il est très important de comprendre les caractéristiques d’écoulement de ces avalanches. Puis à terme, de planifier des mesures de protection pour garantir au mieux la sécurité de toutes personnes en train de s’adonner à leur passion.

De ce fait, un projet appelé SensorBall a été créé en partenariat avec le [SLF](http://www.slf.ch/fr)(Institut pour l'étude de la neige et des avalanches) et le Laboratoire d'aérodynamique et mécanique des fluides industrielle de l'[HEPIA](https://www.hesge.ch/hepia/laboratoire/laboratoire-daerodynamique-et-mecanique-des-fluides-industrielle).

Les SensorBalls sont des balles qui vont mesurer les propriétés des avalanches en cours d’écoulement et pouvoir récupérer des données sur un phénomène encore mal connu et difficile à étudier du nom de "nuage", c’est-à-dire le mélange d'air et de neige qui se produit au-devant d’une avalanche.

Pour pouvoir faire ces mesures, il va donc falloir placer des capteurs (les sensorBalls) directement dans la neige et lors du déclanchement de l’avalanche, ils vont se faire ensevelir et prendre nombres de mesures.

## But du projet

Ce projet a pour objectif de retrouver l’emplacement des SensorBalls lorsque l’avalanche a fini de s’écouler.

Pour ce faire il faudra dans un premier temps créer un protocole de transmission qui permettra au balles d’émettre chacune un signal (les balles ont déjà été designées dans un projet précédant ce travail de diplôme.)

Dans un second temps, il faudra réussir à détecter le signal des différentes balles et de réussir à lire les données transmises.

Pour finir, il faudra mettre à disposition d’un utilisateur un affichage qui permettra détecter la position des balles par rapport à la puissance de la radiation lorsqu’une balle émet un signal. C’est-à-dire que plus la personne se rapprochera d’une des SensorBalls, la puissance reçue par l’appareil de réception sera élevée.

## Tâches à réaliser

Pour mener à bien ce projet, plusieurs taches devront être réalisées :

* La conception des antennes réceptrices. C’est elles qui recevront les données émises par les SensorBalls.
* La conception d’un circuit analogique entre les antennes et un microprocesseur.
* Traiter le signal que reçoit le microprocesseur. Il Faut analyser les données reçues pour pouvoir déterminer avec précision la position des SensorsBalls.
* Créer un interface graphique facile d’utilisation qui permette de guider facilement la personne vers les balles.
* Créer un protocole de transmission pour que chaque balle puisse envoyer leur identifiant.

# Conception

Afin de pouvoir réaliser cette détection avec précision, 2 antennes seront utilisées.

La première, une antenne logarithmique, sera utilisée pour la détection globale de la position des balles, va aussi permettre de récupérer les données transmises par celles-ci.

La deuxième, une antenne sous forme de boucle, sera utilisée pour détecter avec plus de précision la position des balles

## Schéma de principe

Le projet fonctionnera comme suit :

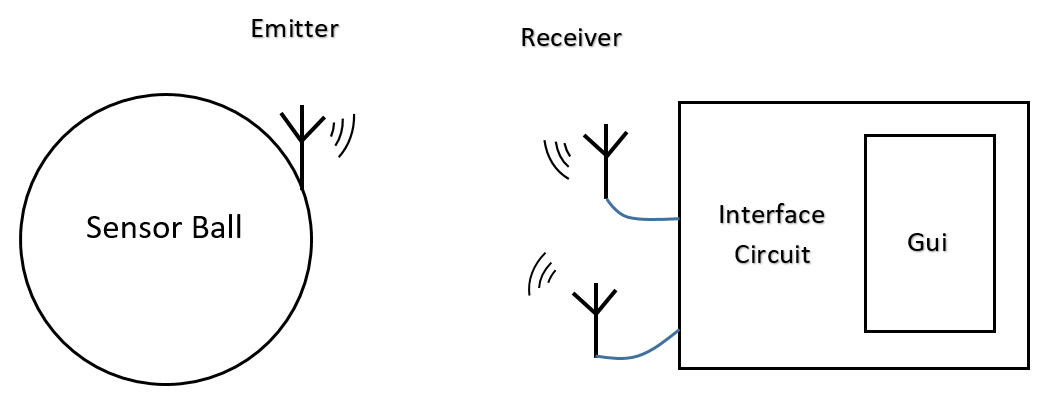


Figure 1 : schéma de principe

Coté émetteur, Les SensorsBalls vont chacune émettre leur ID grâce à une antenne qui a été designée au préalable ce qui permettra à l’utilisateur de savoir vers quelle balle il se dirige.

Coté réception, une antenne va capter le signal et décoder les données puis aussi regarder la puissance du dit signal grâce au circuit d’interface. La 2ème antenne elle est utile car elle pourra donner la direction de manière plus précise. Elle va en fait compléter les données de la 1ère antenne.

Donc, si la balle en train d’émettre est la balle que l’utilisateur a choisi de capter au moyen de l’interface graphique (Gui), la puissance du signal qui a été capté sera retransmise sur cette même interface graphique. Cela permettra à utilisateur de savoir dans quelle direction aller.

Plus il avancera en direction de l’antenne, plus le signal sera fort et donc l’indication de puissance sur le Gui augmentera sa valeur.

## Antenne log-périodique

### RÃ©sultat de recherche d'images pour "antenne log periodique"Définition

Figure 2: antenne log-périodique

Une antenne log-périodique est une antenne dont l’impédance et le diagramme de rayonnement sont répétitifs selon une loi logarithmique en fonction de la fréquence. Pour obtenir cette propriété, les dimensions doivent être homothétiques le long de la direction de rayonnement principal.(wikipedia, s.d.)

Le réseau de dipôles log-périodique (log periodic dipole array ou LPDA) est la plus courante, et est celle qui sera utilisée pour la réception du signal

### Analyse

Cette antenne a été choisie du fait de son pattern de radiation qui correspond aux attentes de ce projet.

Le pattern de radiation permet en fait de voir dans quelle direction l’antenne et la plus efficace

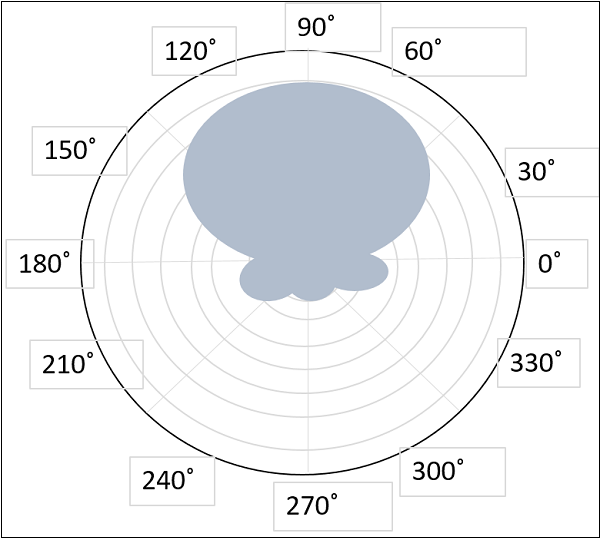


Figure 3 : radiation de l'antenne LPDA

Source: Antenna Theory - Log-periodic Antenna

Ce pattern de radiation est très intéressant car il est directionnel. Cela veut dire que plus cette antenne est en face de l’objet qui émet le signal, plus la radiation sera forte ce qui est fort utile pour pouvoir connaitre l’emplacement de l’objet source.

### Design

La directivité en espace libre d’un réseau dipolaire log-périodique (LPDA) est fonction de deux constantes. Son facteur de mise à l’échelle τ et son espacement relatif σ.

En raison des ressources limitées, les antennes log-périodiques radioamateurs sont souvent limitées à des valeurs de τ entre 0,8 et 0,95, avec des valeurs de σ entre 0,03 et 0,06

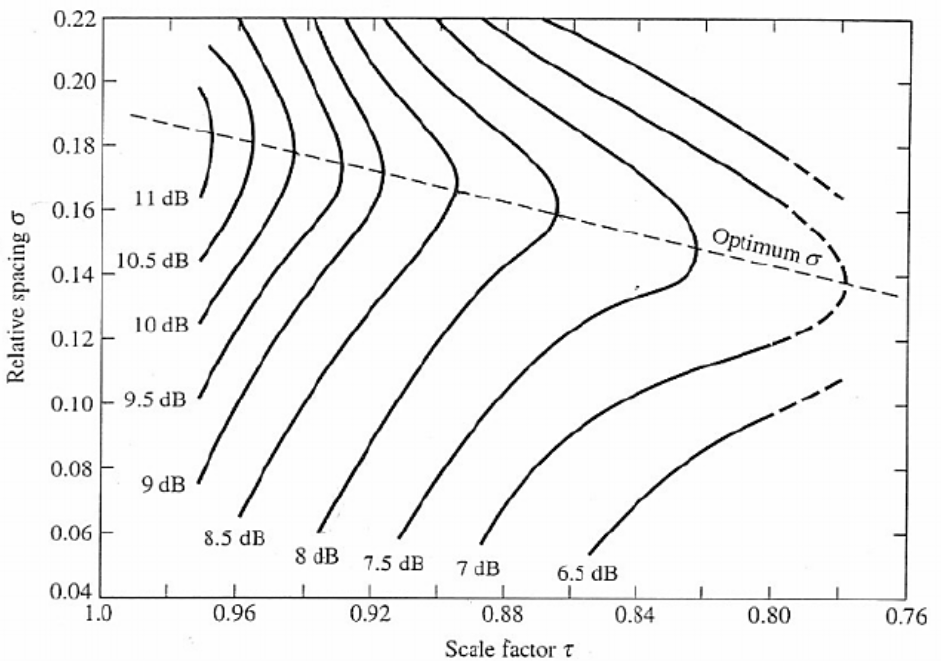


Figure 4: Directivité constante vs σ et τ

Source: journal of microwave engineering & technologies

ISSN: 2349-9001 © STM Journals 2017

Pour l’antenne à concevoir, la valeur de τ a été définie à 0.8 et celle de σ à 0.095.

Ces valeurs pourront être modifiées si les résultats des simulations ne correspondent pas aux résultats attendus.

Il faut aussi définir une fréquence assez basse pour que les ondes puissent traverser une couche de neige poudreuse et aussi assez haute pour que l’antenne puisse fonctionner avec le moins de pertes possibles.

La fréquence choisie est 434MHz, qui est aussi la fréquence à laquelle les sensorsBalls émettent. Il reste toutefois a vérifier la réele efficacité de cette frequence directement sur le terrain.

La Bande passante B à été definie à ~30MHz.

Maintenant que σ, τ, B et F sont définis, il est possible de calculer grâce à la procédure de design donné par L. B. Cebik.

( 1 )

( 2 )

( 3 )

( 4 )

( 5 )

( 6 )

( 7 )

( 8 )

*Source: the 21st edition of*The ARRL Antenna Handbook

Voici le schéma 2D permettant la construction d’une LPDA avec les différents paramètres calculés plus haut :

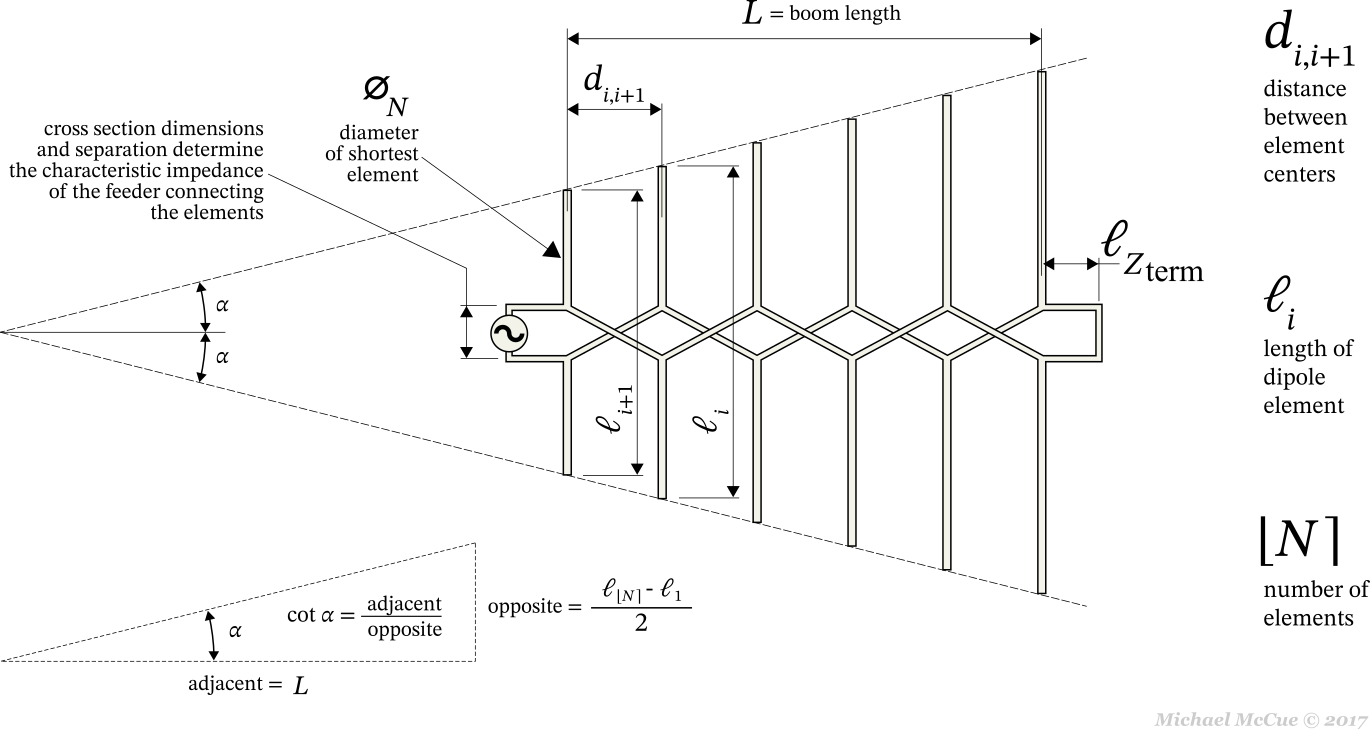


Figure 5: représentation d'un LPDA

Source : <https://hamwaves.com/lpda/en/index.html>

Le 1ème paramètre à calculer est le nombre d’éléments à placer sur l’antenne.

* L’équation (1)permet de determiner l’angle α que dois prendre l’antenne.
* L’équation (2)donne la valeur de Bar (relative bandwidth of the active region) la bande passante relative de la region active. Le Bar permet de calculer Le Bs (relative bandwidth of the structure), la bande passante relative de la structure donné par l’équation (3).
* Il est alors possible de calculer le nombre minimum d’éléments N à fixe sur l’antenne au moyen de l’equation (4). Ce qui donne dans le cas de l’antenne qui doit être réalisée dans le cadre de ce projet, 4 éléments.

Le 2er paramètre à calculer est la longueur Li de chaque élément de l’antenne grâce aux équations vues plus haut.

* L’équation (5) permet de connaitre la fréquence la plus basse à laquelle la reception du signal doit encore être possible.
* L’équation (6) permet de trouver la longueur du plus grand des éléments
* Avec la longueur du plus grand élément, il devient possible de calculer les autres éléments grâce au rapport : 𝜏 = ℓ𝑖/(ℓ𝑖−1) comme le montre l’équation (7).

Les resultats de ces calculs ont été consignés dans le tableau suivant et serviront de base pour la construction de l’antenne.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | L0 | L1 | L2 | L3 |
| Length of dipole element [mm] | 356.89578 | 285.5166 | 228.4133 | 182.7306 |

*Tableau 1: longueur des éléments de l'antenne*

Le 3ème paramètre à calculer est la distance entre chaque élément de l’antenne soit la distance relative di,i+1.

* L’équation (8) permet de trouver la distance relative entre chaque élément.

Les resultats de ces calculs ont été consignés dans le tableau suivant et serviront de base pour la construction de l’antenne.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | D0 | D1 | D2 | D3 |
| Distance of dipole element [mm] | 67.83 | 122.094 | 165.5052 | 254.5052 |

Tableau 2: distance de chaque éléments de l'antenne (par rapport au point 0)

Le dernier paramètre à calculer est la longueur de la terminaison LzTerm est peut être trouvé avec l’équation suivante :

( 9 )

Le résultat de l’équation (9) donne comme valeur 89mm.

Grâce à cette valeur, il est maintenant possible de calculer la longueur totale des 2 tiges verticales qui composent l’antenne.

Le calcul pour trouver la longueur maximum de l’antenne sera donc:

( 10)

Dans le cas de cette antenne, le résultat est de 256mm de long.

Un paramètre qui reste encore à être défini est la distance entre les 2 tiges de l’antenne. Comme les calculs pour déterminer cette distance sont très compliqué, la distance sera dans un premier temps fixée à 4mm mais pourra être changée après les simulations si elle n’est pas bonne.

Cette distance permet de régler l’impédance finale de l’antenne ce qui permet d’éviter de devoir faire une adaptation si l’impédance ne correspond pas à l’impédance d’un câble coaxial (50Ohms).

Maintenant que les calculs sont faits, l’antenne va pouvoir être dessinée et simulée grâce au logiciel Ansys.

Voici une représentation 3D de l’antenne finale :

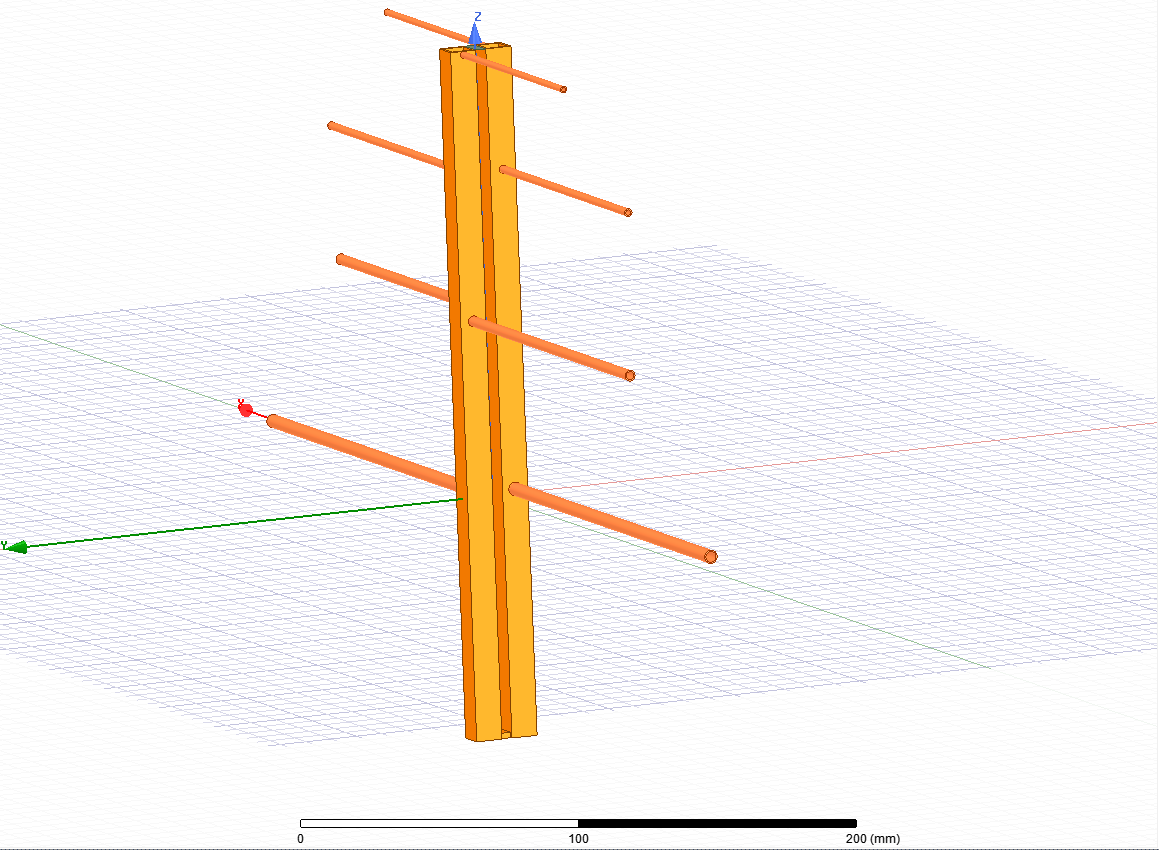


Figure 6: design final de l'antenne LPDA

Les éléments perpendiculaires qui sont à la même hauteur sont croisés. C’est-à-dire qu’ils ne sont pas sur la même tige verticale.

Il ne faut pas oublier que les 2 tiges doivent être connectés électriquement au fond de l’antenne pour fonctionner correctement.

### Simulation

La simulation de l’antenne va permettre de vérifier si certaines valeurs doivent être modifiées afin qu’elles répondent mieux aux attentes.

Trois paramètres sont à vérifier :

* Le coefficient de réflexion S : lorsqu’un signal est transmis sous forme d’onde, une certaine partie de cette onde sera réfléchie. Ce paramètre permet de déterminer le rapport onde transmise sur onde reçue. Plus ce paramètre est faible, plus le signal sera de bonne qualité car moins réfléchi.
* L’impédance de l’antenne : elle doit être le plus proche possible de l’impédance de la ligne de transmission (câble coaxial 50Ohm) ce que permet de d’éviter la réflexion. Si l‘impédance n’est pas bonne, il faudra adapté l’antenne pour correspondre avec la ligne de transmission.
* La radiation : elle montre comment et avec quelle puissance sera transmise l’onde (en 3D). Si l’antenne n’a pas été designée correctement, l’onde aura une faible puissance dans la direction escomptée et la distance de transmission sera moins grande.

Ces informations seront données par le logiciel Ansys soit sous forme de graphe XY ou sous forme de smith chart ce qui permettra de vérifier le bon fonctionnent des antennes.

Se référer au chapitre Annexe pour la démarche de simulation.

#### Impédance

Sur le graphique ci-dessous, l’impédance de l’antenne est très proche de 50Ohms en réel est la valeur imaginaire est proche de 0 à la fréquence souhaitée. Cela indique de l’antenne n’aura pas besoin d’être adaptée car très proche des valeurs souhaitées.

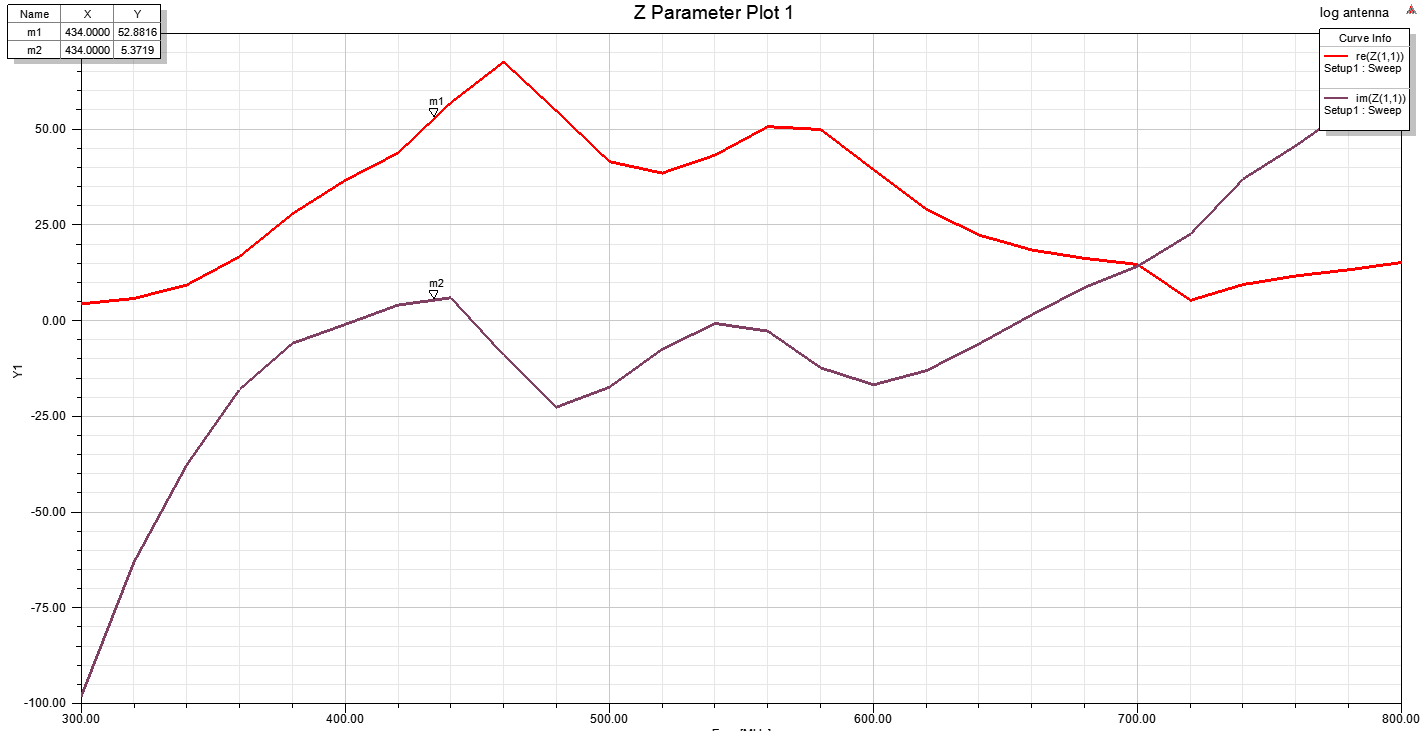


Figure 7 : impédance de l'antenne LPDA

#### Réflexion

Sur le graphique ci-dessous, la réflexion est dessinée en fonction de la fréquence. Il est à observer que le point le plus bas est à 460MHz.

À la fréquence de travail soit 434MHz, la réflexion est de -10dB ce qui est satisfaisant pour l’utilisation qui doit être faite de l’antenne.

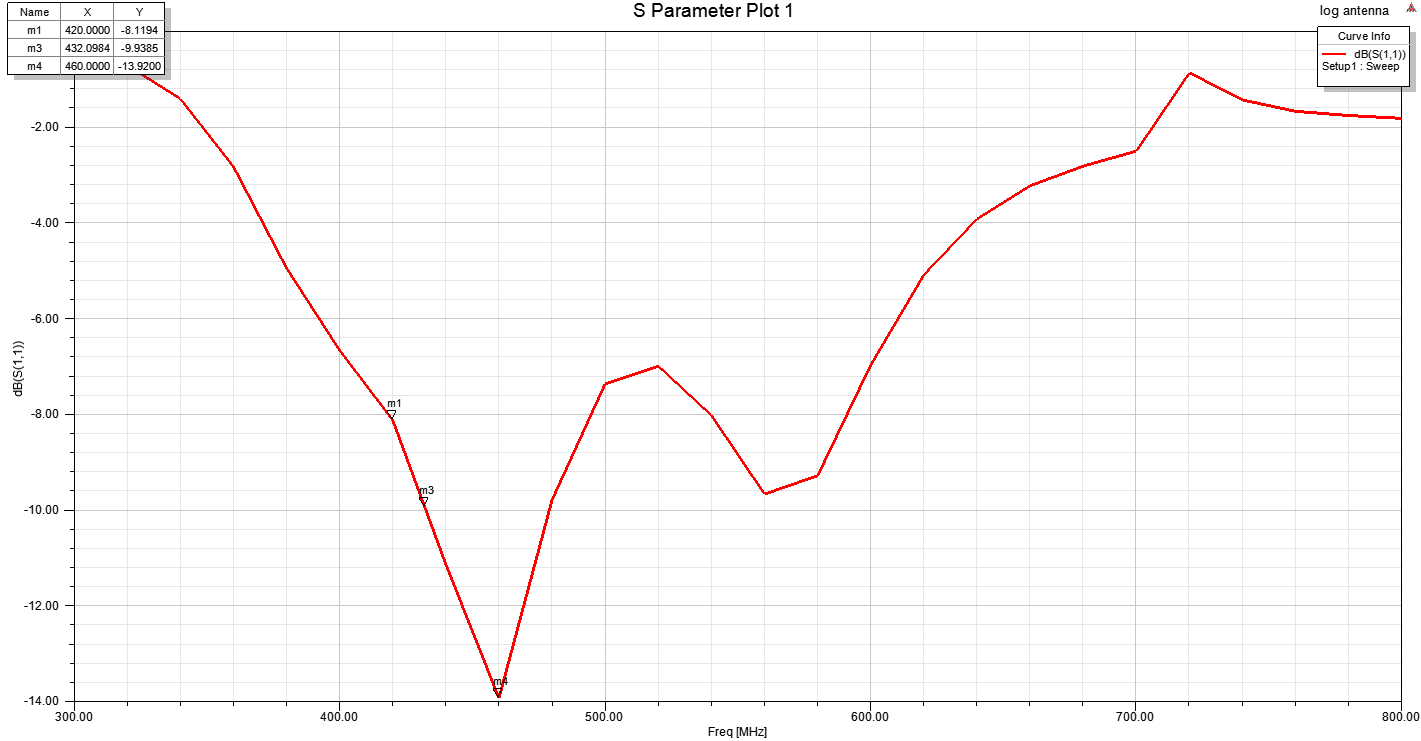


Figure 8 : réflexion de l'antenne LPDA

#### Radiation

Sur le graphique ci-dessous, les ondes émises par l’antenne irradient fortement dans une direction (partie rouge). Inversement dans l’axe perpendiculaire à la radiation, la puissance est beaucoup moins forte (vert et bleu) ce qui correspond aux résultat attendus.

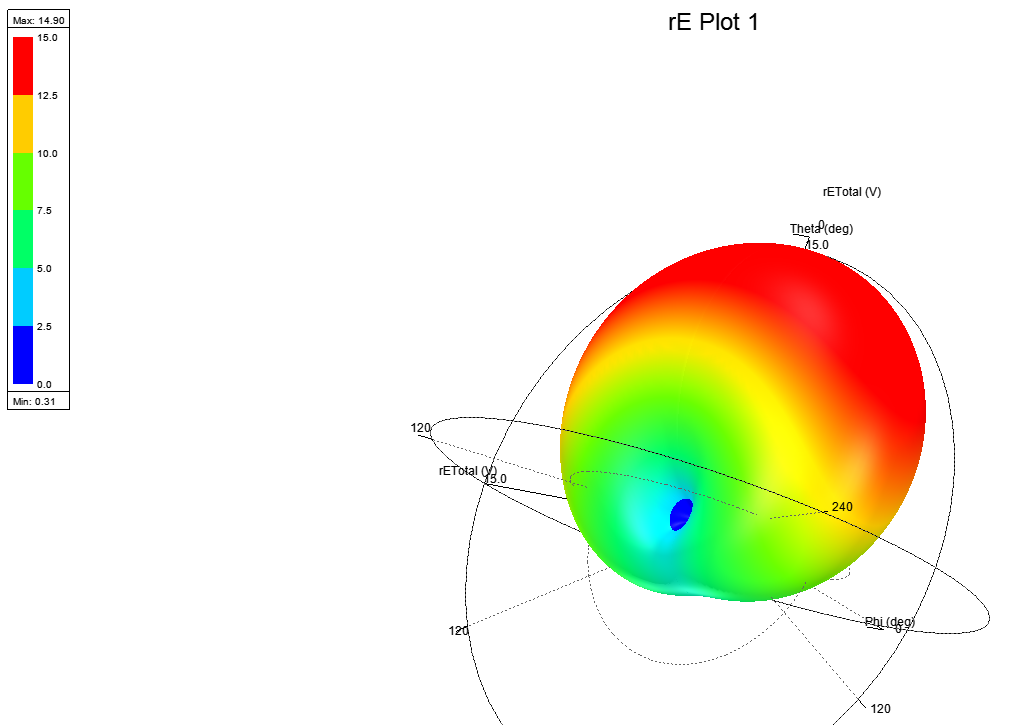


Figure 9 : radiation de l'antenne LPDA

Si le graphe est superposé avec l’antenne, cela indique comment l’antenne devra être tenue pour pouvoir détecter au mieux les sensorBalls.

L’image ci-dessous montre la position de l’antenne avec son graphe de radiation :

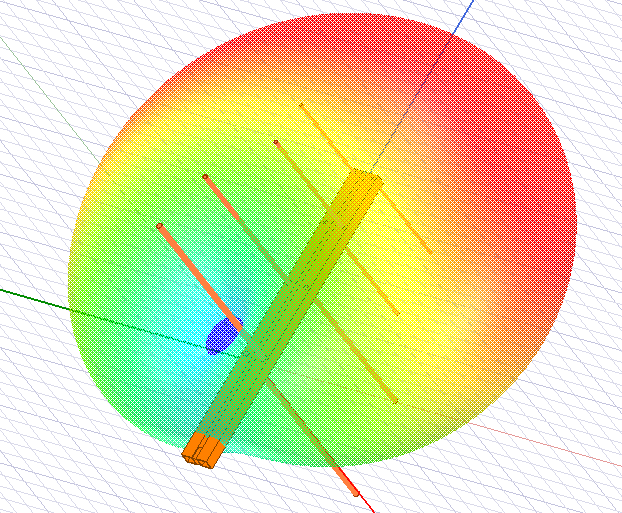


Figure 10 : radiation de l'antenne LPDA avec l'antenne

### Tests et résultats

Dans cette partie, les antennes seront mesurées et leurs résultats seront comparé avec les simulations précédentes pour vérifier le bon fonctionnement de celles-ci.

#### PCB Test

Pour ce faire, un Analyseur de réseau (Network Analyser), un Agilent E5071C sera utilisé pour les mesures. Pour pouvoir connecter cet appareil avec l’antenne, un petit circuit va devoir être créer.

Celui-ci permettra de connecter la sortie de l’antenne sur les 2 ports de l’Agilent.

L’antenne viendra se visser à l’entrée est sortira sur deux connecteur SMA qu’il faudra connecter sur l’Agilent au moyen d’un câble coaxial.

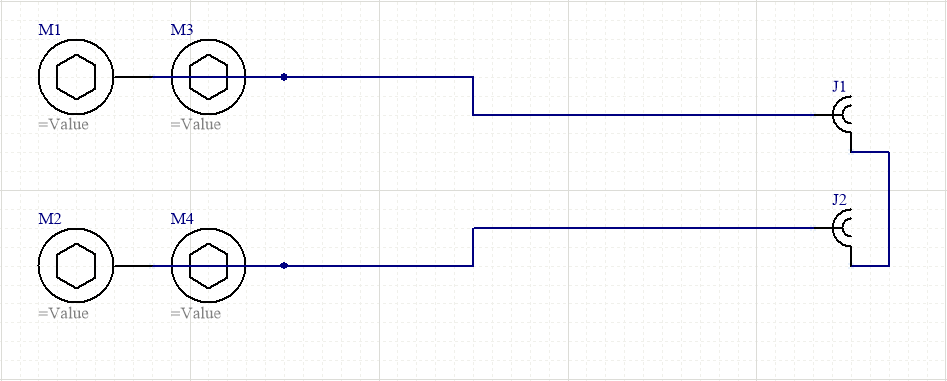


Figure 11 : schéma PCB test LPDA

Il y a 2 vissent par connexion sur l’antenne sur que permettra de créer un trou allongé. Il est nécessaire d’exécuter cette étape pour pouvoir régler les distances des 2 tiges verticales comme discuté plus haut.

La partie routage du PCB sera donné en Annexe.

#### Mesures

Les mesures prisent avec l’Agilent donnent une bonne appréciation des résultats mais ne sont pas des plus précises. Beaucoup de perturbations électromagnétiques à côté de l’antenne dues aux autres appareils électriques et à tout ce qui est métallique trop proche de ladite antenne peuvent faire baisser ses performances.

##### Réflexion

Sur ce graphe, la réflexion est la plus basse à 434MHz. Ce qui indique que le transfert de puissance est le plus grand à cette fréquence et indique que l’antenne a été correctement designée.

La valeur de la réflexion est de -13dB à 434MHz. Cela est suffisant pour l’utilisation qui en est faite.

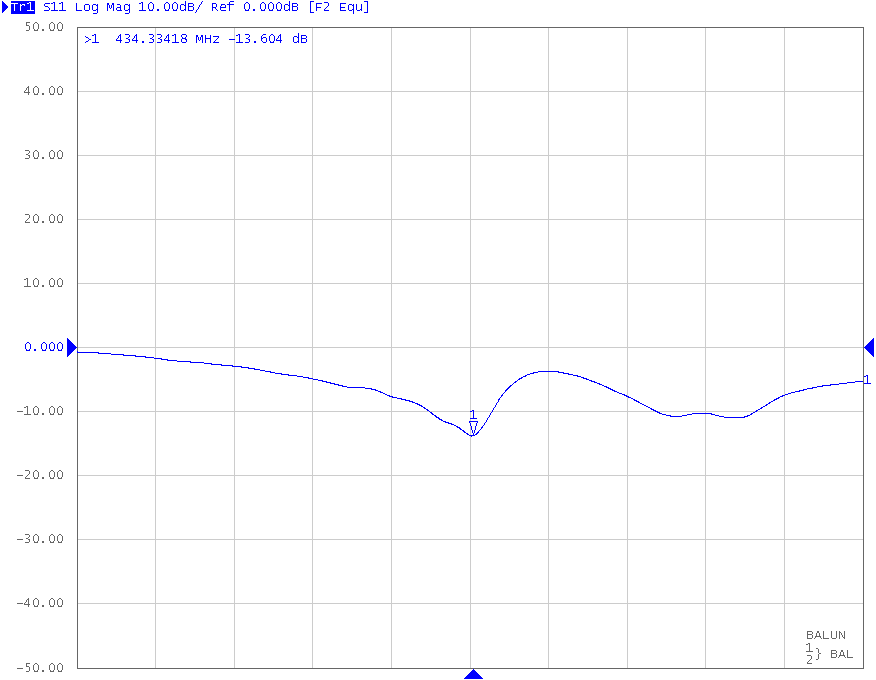


Figure 12 : réflexion de l'antenne LPDA

##### Impédance

L’impédance et, cette fois donnée sous forme d’un diagramme de Smith. Le marqueur 1 indique la fréquence 434Mhz. Pour éviter un adaptation d’impédance, le curseur doit être le plus près possible du centre du graphe qui indique 50Ohm et aucune valeur imaginaire.

Ici, le point est à 34,4 + 8.4i Ohms. La valeur imaginaire est plutôt correct tandis que la valeur réelle est un peu basse mais reste encore valide compte tenu de la précision de l’appareil de mesure.



Figure 13 : impédance de l'antenne LPDA

#### Comparaison mesures simulation

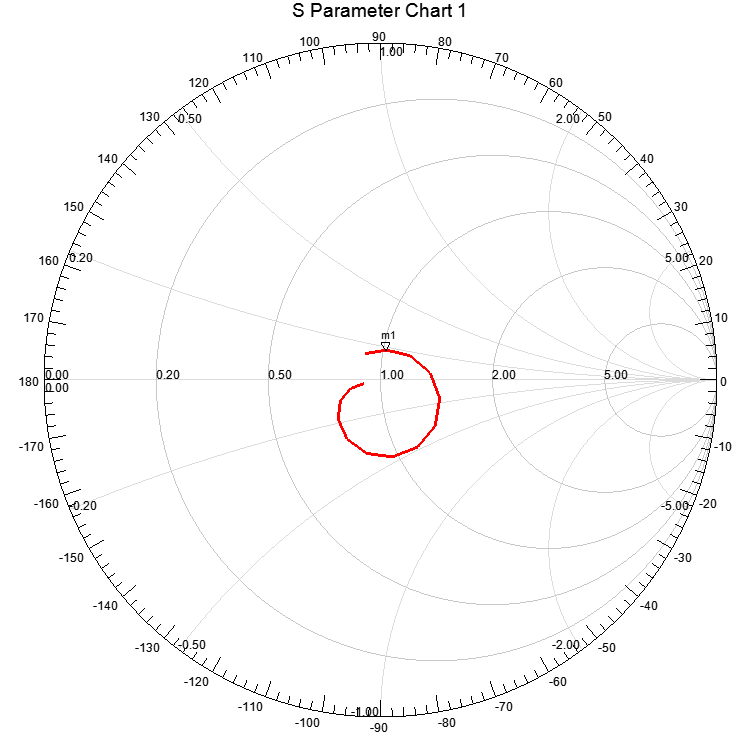


Figure 14 : Smith chart simulé de la LPD



Figure 15 : Smith chart mesuré de la LPDA

Une manière simple de comparer les résultats entre la simulation et les mesures d’une antenne est le Smith chart. Il permet de visualiser l’efficacité de de l’antenne sur une plage de fréquence.

Les valeurs intéressantes se situent vers la fréquence de fonctionnement, soit 434MHz.

Sur la Figure 14 (simulation)la fréquence 434MHz et la plage de fréquence qui forme un cercle (rouge) sont très près du centre du graphe ce qui est très bon.

Mais sur Figure 15 le cercle (bleu) lui est un peu décalé du centre. Il faut alors observer que l’antenne est une réalité un peu plus inductive que sur simulation.

Vu que la différence entre les simulations et la réalité est faible, cette antenne sera conservée telle quelle.

#### Résultats

D’après les mesures prisent plus haut, l’antenne est dans l’ensemble correcte. Il faudra ensuite tester le projet dans sa globalité pour pouvoir vérifier si l’antenne fonctionne va fonctionner correctement avec les autres composants.

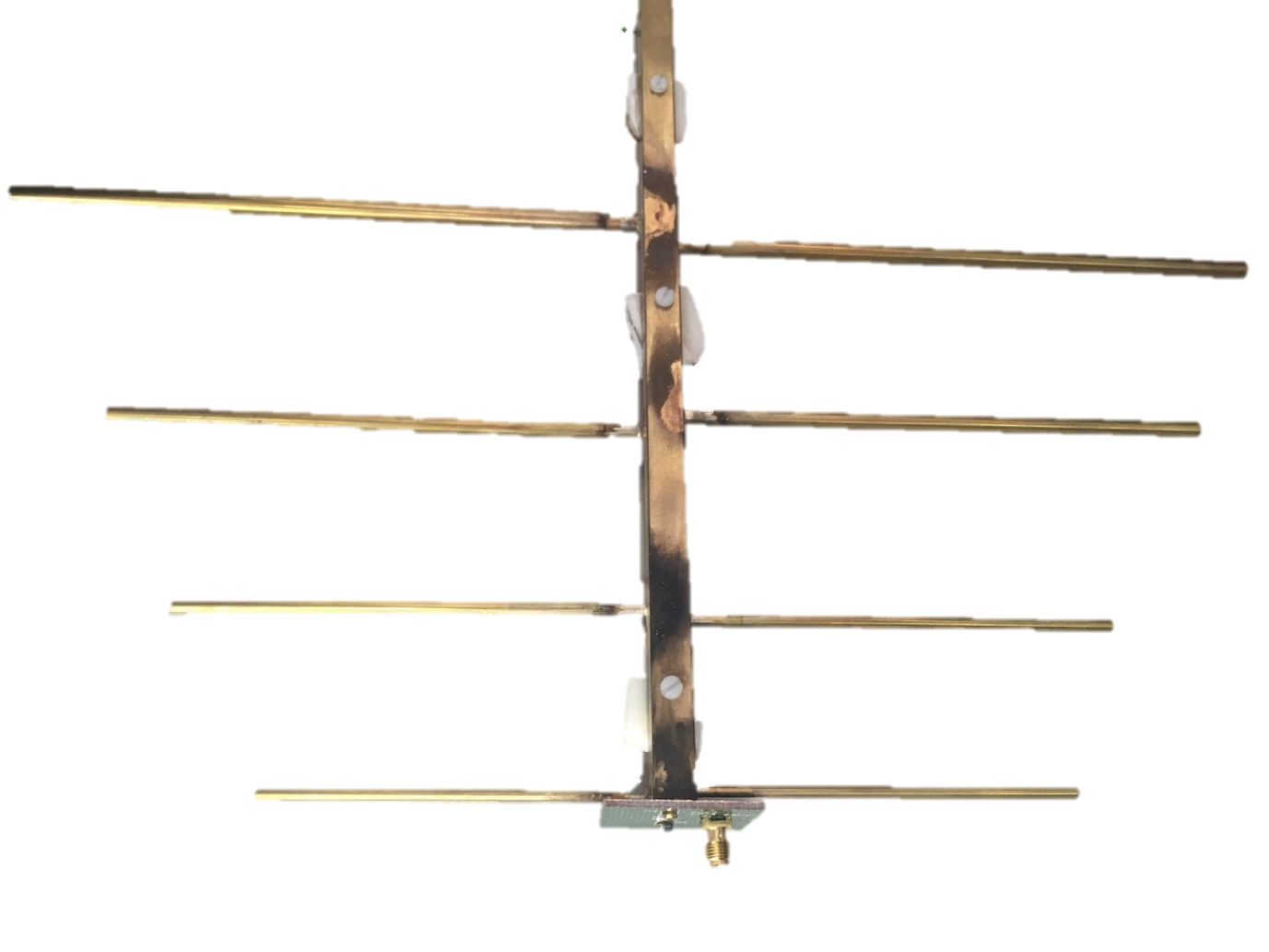


Figure 16 : Antenne finale

## Antenne en boucle (Loop Antenna)

### Définition



L’antenne en boucle une antenne radioélectrique construite avec une simple boucle ou une bobine de fil, de tube ou autre [conducteur électrique](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conductor). Il en existe plusieurs types d’antennes en boucle. Celle qui sera utilisée est la grande antenne en boucle auto-résonante qui a une circonférence proche de la [longueur](https://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength) d'[onde](https://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength) de la [fréquence de](https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency) fonctionnement et est donc [résonante](https://en.wikipedia.org/wiki/Resonant) à cette fréquence.

### Analyse

Cette antenne a été choisie car son pattern de radiation complète très bien celui de la première antenne, ce qui permettra d’être très précis pour la détection des balles

### Design

Pour le design de cette antenne, la fréquence est la même que précédemment, soit 434MHz.

La construction est plutôt simple, il s’agit simplement d’un fil de cuivre qui sera placer autour d’un cadre circulaire créé avec une graveuse laser.

Comme expliqué au point 2.2.1, le périmètre doit être égal à la longueur d’onde . Il est donc possible d’écrire :

( 11 )

( 12 )

Avec l’équation (12), il est donc possible de calculer le rayon de la boucle.

Avec C la vitesse de la lumière et F 434MH, le résultat de l’équation est de 0.110m soit 110cm.

Voici une représentation 3D de l’antenne finale :

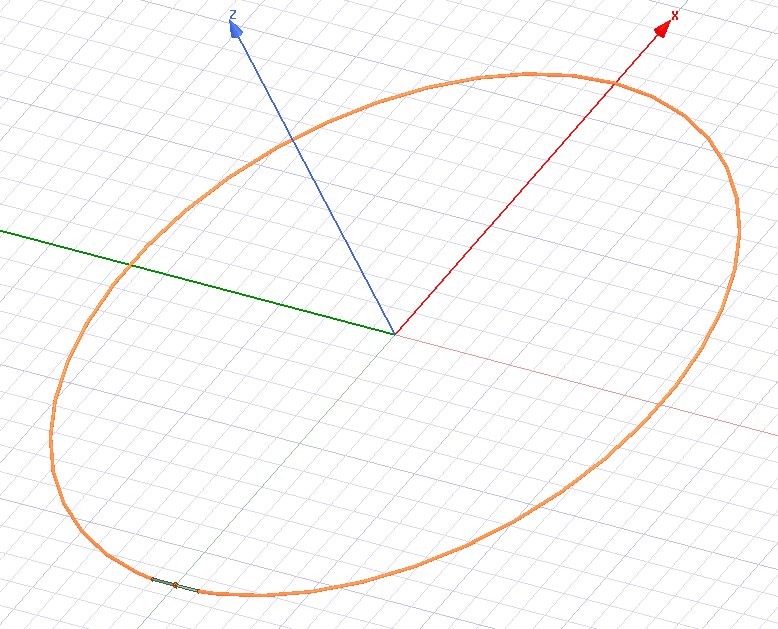


Figure 17: design final de l'antenne LOOP

Sur AnSys, le socle ou passe le fil n’est pas dessiné car il n’est pas important pour simuler l’antenne.

### Simulation

Comme pour l’antenne précédente, la simulation de l’antennes v permettre de vérifier si certaines valeurs doivent être modifiées afin qu’elles répondent mieux aux attentes.

Les 3 même paramètres que précédemment seront testés

#### Impédance

Sur le graphe ci-dessous, l’impédance à la fréquence de travail est de 122Ohms. Cela indique que l’antenne aura besoin d’une adaptation d’impédance pour pouvoir travailler à 50Ohms.

La valeur imaginaire vaut, elle, -84Ohms. Cela montre que l’antenne peut être tunnée pour obtenir un meilleur résultat.

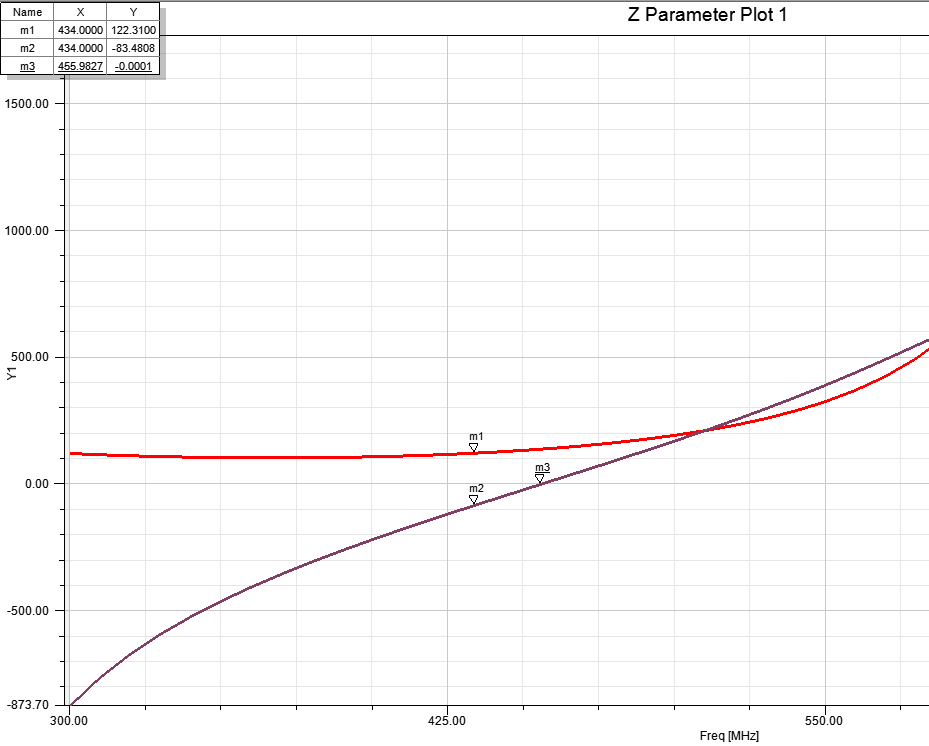


Figure 18 : impédance de l'antenne LOOP

#### Réflexion

Sur le graphique ci-dessous, le point m1 soit 434Mhz est très haut par rapport au creux donc il va falloir tunner l’antenne pour avoir un meilleur résultat.

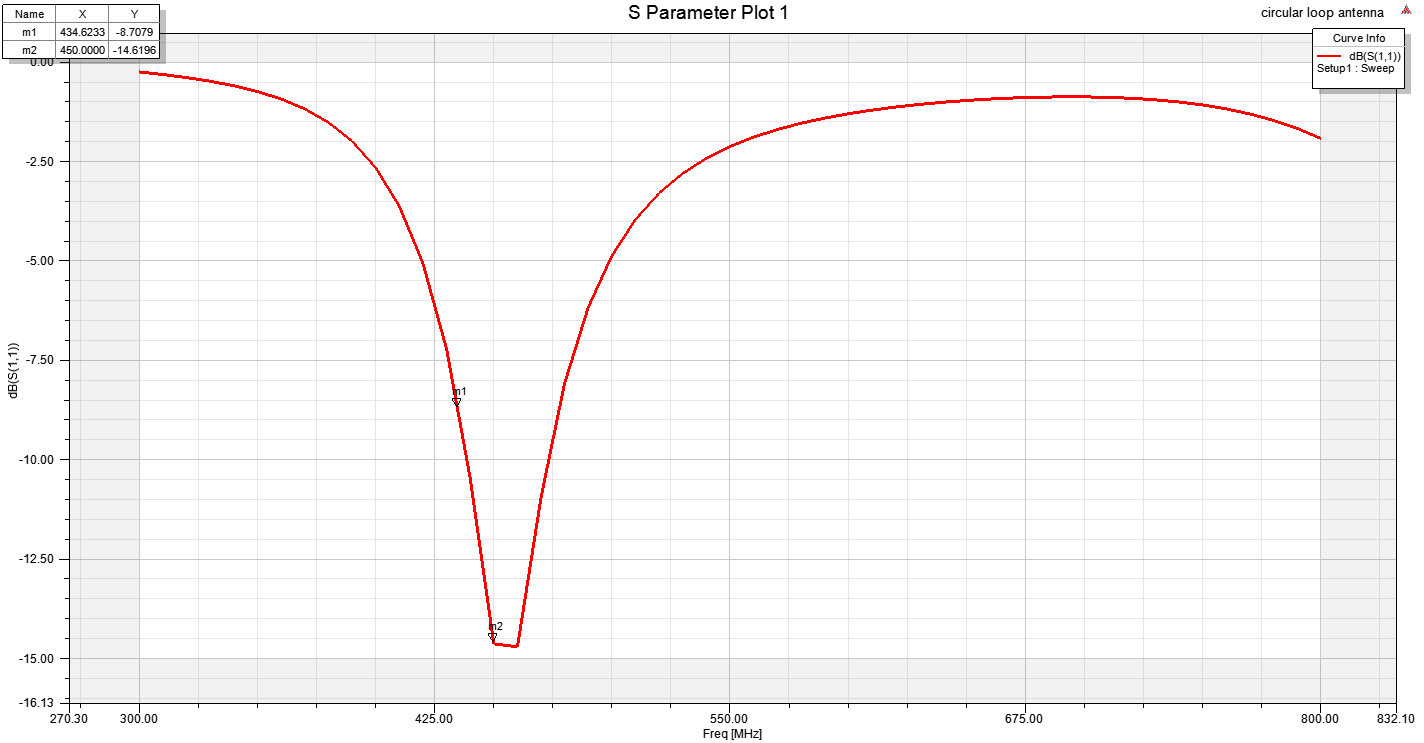


Figure 19 : réflexion de l'antenne LOOP

#### Tunning

La première façon de tunner l’antenne est de changer l’ouverture des deux câbles. La Figure 16 montre cette ouverture. (Petite partie verte vers le bas de la boucle).

La 2ème façon et celle qui sera utilisée de changer le rayon de l’antenne. Pour pouvoir trouver ce rayon, il va falloir faire un rapport entre la fréquence de travail actuelle et celle ou la valeur imaginaire de l’impédance vaut 0. Ces informations peuvent être trouvées sur la Figure 17.

Le rapport sera donc de 457/434. Ce qui donne comme résultat 1.053.

#### Impédance corrigée

Avec le tuning, l’impédance est maintenant correct pour la partie imaginaire elle atteint presque 0. Par Contre la partie réelle est encore grande et il faudra quand même penser à adapter cette antenne pour avoir une valeur correcte.

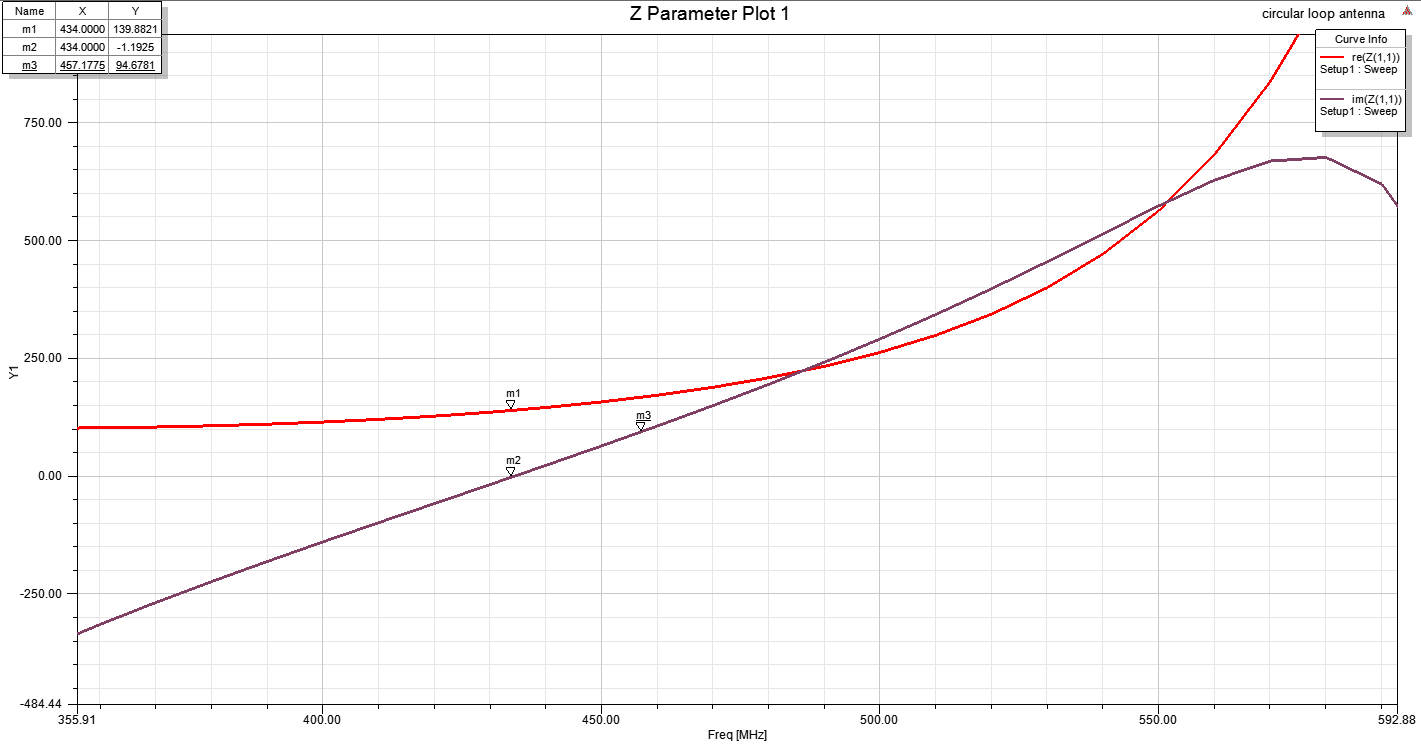


Figure 20 : impédance de l'antenne LOOP après tuning

#### Réflexion corrigée

Pour la réflexion, les résultats sont plus que corrects. A la fréquence de travail, la réflexion est pratiquement la plus faible.

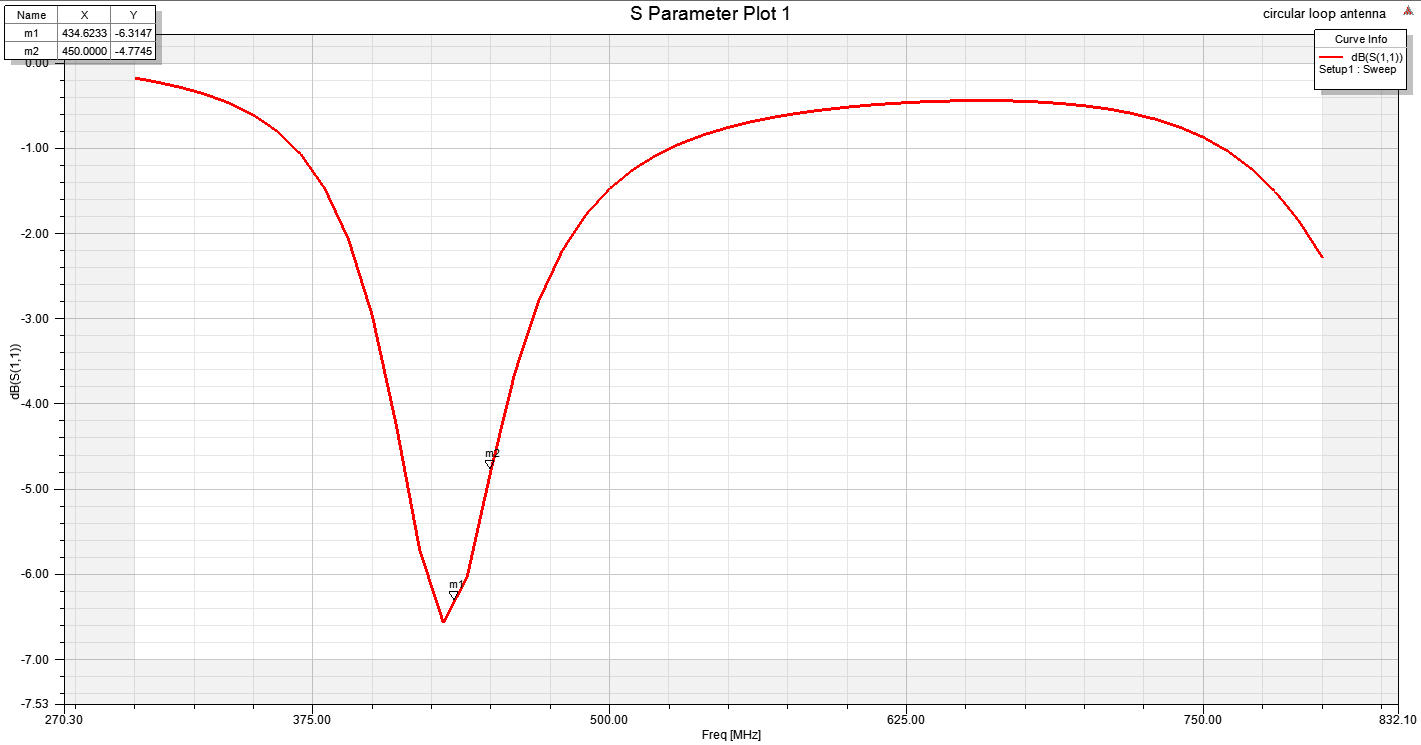


Figure 21 : réflexion de l'antenne LOOP après tuning

### Tests et résultas

## Circuit d’interface

Pour pouvoir traiter les données des antennes, un circuit d’interface doit être conçu. Ce circuit devra obligatoirement remplir plusieurs taches si la partie graphique veut pouvoir afficher correctement les données.

Ces taches seront :

* De trouver la puissance du signal pour pouvoir le transmettre sur un port analogique d’un microcontrôleur.
* Démoduler le signal pour pouvoir recevoir l’id de la balle de manière sérielle puis d’envoyer ce signal aussi sur cette fois sur un port digital d’un microcontrôleur.

### Balun

Pour pouvoir passer d’une antenne à un câble coaxial ou d’un câble coaxial au PCB d’interface, il sera recommandé d’utiliser un Balun

#### Définition

Un balun est un circuit électrique utilisé pour effectuer la liaison entre : une [ligne de transmission](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_de_transmission) [symétrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sym%C3%A9trie) ([ligne bifilaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_bifilaire) ou lignes imprimées parallèles) et une ligne de transmission [asymétrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Asym%C3%A9trique) ([câble coaxial](https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A2ble_coaxial) ou ligne imprimée au-dessus d'un plan de masse). (wikipedia, s.d.)

# Programmation

## Logique

## Affichage

# Tests et résultats finaux

# Améliorations futures

# Conclusion

# Annexes

Simulation Ansys

Schéma + pcb + 3d